Energy, Mines and Resources Canada | Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology | Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

NOUVELLES TECHNIQUES EN FONDERIE

Texte d'une conférence présentée à l'American Society for Metals, Montréal, le 1er décembre 1981.

K.G. DAVIS
SECTION DE LA FONDERIE

JANVIER 1981

PROGRAMME DE RECHERCHE EN MINERAUX

#2pp

LABORATOIRES DE RECHERCHE EN METALLURGIE PHYSIQUE

RAPPORT: PRM/LRMP 81-78F(TR)

LABORATOIRES DE RECHERCHE EN MÉTALLURGIE PHYSIQUE
RAPPORT PRM/LRMP 81-78F (TR)

NOUVELLES TECHNIQUES EN FONDERIE

Texte d'une conférence présentée à l'American Society for Metals, Montréal, le 1er décembre 1981

par

K.G. Davis

INTRODUCTION

Il y a dix ans, il y avait au Canada environ 230 fonderies d'acier et de fonte. Maintenant, il en reste environ 170. Cette réduction est partiellement un symptôme des tendances mondiales, car d'autres pays ont des chiffres similaires. De nouveaux matériaux ont remplacé certaines pièces coulées. Par exemple, pensez aux tuyaux de plastique pour la plomberie.

On doit noter, cependant, que le tonnage total des pièces coulées d'acier et de fonte au Canada a augmenté pendant cette même période. Beaucoup de pièces coulées seraient très difficiles à produire par d'autres techniques. Considérons, par exemple, la fameuse tasse avec soucoupe et cuiller, qui était utilisée à une époque comme test d'adresse pour un apprenti de fonderie (fig. 1). On peut imaginer le coût astronomique d'usiner ou de fabriquer un tel objet. Si les fonderies pouvaient s'ajuster aux changements, elles pourraient continuer à vendre leurs produits.

Il y a deux influences particulièrement importantes qui poussent les fonderies vers des changements. La première est le coût d'énergie, qui augmente continuellement. Malgré des réductions significatives de l'utilisation par conservation, les fonderies restent très dépendantes de l'énergie. La fusion elle-même prend environ 60% de l'énergie globale utilisée dans une fonderie ferreuse typique, et on ne peut pas couler du métal sans le fondre (tableau 1). Un autre point qui exerce une grande influence sur les fonderies est la nécessité d'améliorer l'environnement, pas seulement de diminuer la pollution aux environs de la fonderie, ce qui a été achevé en grande mesure,

mais aussi d'améliorer des conditions de travail. Une fonderie démodée n'est pas un mileu agréable. Les conditions ne sont pas exactement comme l'illustration du 19ème siècle, mais néanmoins des fonderies d'aujourd'hui sont souvent chaudes, poussiéreuses, et mal éclairées. Même la fonderie expérimentale du LRMP n'a pas ce qu'on considère normalement des conditions de travail idéales (fig. 3,4). On doit chercher longtemps pour trouver un père ou une mère qui rêve de voir un jour son fils ou sa fille travailler dans une fonderie. Donc, si on veut persuader les jeunes gens d'embrasser une carrière en fonderie, l'environnement interne doit être sensiblement amélioré.

Les sujets que j'ai choisis sont influencés, inévitablement, par mes propres expériences et intérêts, et les activités au LRMP. Je vous prie d'être indulgents si de temps en temps j'insère des "annonces" pour des projets de notre Section de Fonderie.

LES PROCÉDÉS DE MOULAGE

Le coulage en moules de sable

En ce domaine je vois deux tendances globales. L'une est le remplacement de l'argile par des liants chimiques, qui donnent un meilleur contrôle de dimensions et du fini de surface, et en général utilisent moins d'énergie. La deuxième tendance globale est de remplacer le sable de silice, qui occasionne des problèmes de santé, par des matériaux tels que les sables d'olivine, de zircon, ou de chromite.

Examinons maintenant certaines techniques non traditionelles.

Moulage sous vide. (fig. 5)

Ceci est un procédé breveté, développé au Japon il y a dix ans environ. Deux fonderies canadiennes ont des facilités pour moulage sous vide, et on en prévoit d'autres. Le procédé comporte un changement radical des méthodes traditionelles. Il n'y a aucun liant, seulement du sable sec et une pellicule de plastique qui couvre les parois des moules. Le sable est maintenu rigide par l'application du vide. Après que la pièce est solidfiée, le vide est relâché et le moule s'affaise immédiatement. L'avantage principal du moulage sous vide est l'absence de liants dans le sable. Après que la pièce est enlevée du moule, on peut simplement refroidir le sable et le réutiliser. De plus, le fini de la surface des pièces coulées est excellent. Le procédé se prête mieux aux pièces allongées. Des pièces typiques sont montrées à la

fig. 6. La fig. 7 montre les étapes que nous avons suivies pour couler une plaque en bronze. La qualité de la surface était si bonne qu'il n'y avait guère besoin de la retoucher.

Moulage avec patrons en polystyrene expansé

Dans ce procédé, nommé autrefois "Fullmold", un patron de styrofoam est recouvert d'une couche réfractaire et est placé dans une boîte à moule qui est remplie de sable sec sans liant. La boîte est vibrée afin de tasser le sable autour du patron. Quand on coule le métal dans le moule, le styrofoam brûle et est remplacé par le métal. Après que la pièce s'est solidifiée elle est simplement enlevée du sable. La figure 8 montre un patron de styrofoam et une pièce moulée de fonte, faite d'un patron identique. Comme pour le moulage sous vide, on n'a pas besoin de liant, et le recyclage du sable est extrêmement facile. Les pièces coulée n'ont aucun plan de séparation, et il n'y a donc aucune plaque d'écoulement à enlever. Les têtes de cylindre en aluminium pour les nouveaux produits de General Motors sont coulées de cette manière.

Moulage "Effset" (moules gelés)

L'usage des moules gelés n'est pas commercial en ce moment, mais le procédé a été essayé extensivement dans des conditions industrielles. Les étapes principales sont les suivantes (fig. 9). De l'eau qui contient un peu d'amidon est ajouté au sable, et le sable humide est tassé autour du patron comme d'habitude. Après que le patron est enlevé, le moule est gelé, normalement par évaporation d'air liquide. Le moule gelé est alors coulé. Quelques minutes après, il dégèle et on peut enlever la pièce coulée. Les figures 10(a) et 10(b) montrent un moule gelé, et le même moule 5 minutes après la coulée avec de la fonte. A la fig. 10(c), on voit les pièces coulées. Ce procédé est l'ultime méthode dans le recyclage du sable, parce que le sable ne contient aucun liant à éliminer.

Quand nous avons lu pour la première fois une description des moules gelés, nous nous sommes demandés si la surface d'un tel moule aurait pu survivre pendant la coulée. On peut prévoir l'érosion du sable dégelé pendant le remplissage du moule. Un jour, en plein hiver, pour satisfaire notre curiosité nous avons préparé un moule de sable humide, et l'avons laissé dehors pendant la nuit. Le lendemain matin, avec une certaine hésitation, nous avons coulé le moule avec de la fonte. La coulée était calme, il n'y avait pas

d'érosion de sable en aucun endroit, et la surface de la pièce était d'une qualité excellente.

Le succès commercial de la coulée en moules gelés dépendera du coût de refroidissement. L'économie doit être plus favorable dans un endroit tel qu'Hamilton, où l'azote liquide est un sous-produit des usines d'oxygène nécessaires aux installations d'acier BOF.

Le coulage en moules métalliques

Alliages non ferreux

Le coulage en moules métalliques a des avantages sur le coulage en moules de sable, comme une meilleure qualité de surface, et une meilleure précision dimensionelle. Il y a aussi une amélioration des conditions de travail, due en partie à l'élimination du sable, et en partie à l'automatisation.

Le coulage sous pression des alliages non ferreux est bien établi et fortement automatisé. Il n'y a pas eu récemment de grands progrès. La technologie progresse bien plus rapidement pour le coulage sous basse pression et le coulage en coquille, surtout pour les pièces compliquées avec plusieurs noyaux de sable. On ne peut faire de telles pièces par coulée sous haute-pression, parce que la grande pression et l'entrée rapide du métal liquide dans le moule feraient pénétrer le métal dans les noyaux et feraient aussi éroder et déformer les noyaux.

Une machine à couler sous basse pression fonctionne de cette manière. Un réservoir de métal liquide est gardé dans une chambre qu'on peut préssuriser à environ 15 lpc. Le moule est fermé, et la chambre est préssurisée, afin de forcer le métal liquide vers le haut, à travers un tuyau d'alimentation et dans la cavité du moule, fig. 11(a) et 11(b). Après une pause pendant laquelle le métal se solidifie dans le moule, la pression est enlevée et le métal liquide retombe dans le réservoir, et le moule est ouvert (fig. 11(c)). Une nouvelle variation intéressante est le système "contre-pression", qui a été développé en Bulgarie, voir fig. 12. On l'emploie couramment dans une fonderie à Winnipeg. Il est similaire à la coulée sous basse pression, sauf que le réservoir de métal liquide et l'assemblage de moules sont tous les deux dans les chambres pressurisées. La différence de pression entre les deux chambres contrôle le taux de remplissage du moule. Dans la coulée sous basse pression, la pression qui contrôle le remplissage du moule et la pression sur le métal pendant la solidification est la même. Avec le système contre-pression, ces deux pressions sont contrôlées indépendamment. Il est rapporté

que la solidification sous pression élevée donne les meilleures structures et propriétées. Des pièces coulées sous contre-pression sont montrées à la fig. 13. On note que certaines d'entre elles ont des formes assez simples, tandis que d'autres sont compliquées.

Dans la coulée en coquille, c'est-à-dire la coulée en moule permanent (ou "coulée sous gravité"), le métal liquide est versé via une descente de coulée dans un moule métallique, de la même façon qu'on coule un moule de sable. Ceci constitue un procédé rivalisant avec le coulage sous basse pression. Des exemples de pièces d'aluminium coulées en coquille par Fiat, en Italie, sont montrées à la fig. 14.

La fonte et l'acier

On a déployé beaucoup d'efforts afin de faire des pièces coulées de fonte ou d'acier en moules métalliques. Des pièces de fonte à formes simples ont été faites par moulage en coquille depuis au moins 20 ans, et des pièces assez compliquées sont maintenant coulées en coquille en l'Union Soviétique et en Tchécoslovaquie (fig. 15). D'habitude, les moules sont fabriqués en fonte grise de composition similaire à celle du métal coulé. Il y a présentement une seule fonderie au Canada qui fait de tels produits.

Quant à l'acier, plusieurs compagnies ont tenté de faire des pièces d'acier en moules permanents. Une méthode qui a réussi depuis des années est la coulée des roues de wagons de chemin de fer en moules fabriqués de graphite, dans un genre de système de coulée sous basse pression, fig. 15. Cependant, le graphite s'use rapidement. Alors, pour des pièces plus compliquées, on a besoin de matériaux plus exotiques. Aujourd'hui, les matériaux les plus prometteurs sont des alliages à base de molybdène, et il y a des progrès intéressants dans le moulage sous pression des petites pièces coulées en acier inoxydable dans de tels moules. La compagnie GKN d'Angleterre a développé une méthode nommée Ferro-Di, dans laquelle un petit lingot d'acier est fondu par induction et forcé dans le moule. La figure 17 montre des exemples des produits Ferro-Di. Une autre méthode de moulage permanent d'acier et de fonte est celle de la compagnie suisse Georg Fischer. Le métal liquide est versé, à un taux contrôlé, dans un moule de cuivre refroidi à l'eau. Un bain de fusion est retenu au-dessus du métal solidifié pendant la remplissage du moule. L'appareil est compliqué (fig. 18). La solidification est directionelle, du bas vers le haut, et on n'a pas besoin de masselottes. Les produits princi-

paux jusqu'à maintenant sont les fontes blanches résistante a l'usure, à formes simples.

Au LRMP, nous sommes aux premières étapes d'une investigation de la coulée en moules métalliques. Nous allons étudier la coulée de la fonte grise et ductile, d'abord par le coulage en coquille, et, plus tard, par le coulage sous basse pression.

La coulée sous laitier electroconducteur

Dans ce procédé, le matériel d'alimentation en forme de fil ou de billette est introduit à travers une couche de laitier qui couvre le métal liquide dans le moule (fig. 19). Le laitier est chauffé par un courant électrique. Le métal alimenté fonde tombe à travers le laitier et se mélange à un bain de fusion à la tête de la pièce coulée grandissante. Les moules sont normalement faits de cuivre, refroidis à l'eau. Le procédé est lent, demande beaucoup d'énergie, et se limite aux pièces de forme assez simple. D'autre part, il est moins onéreux d'établir un système de coulage sous laitier électroconducteur que d'établir une fonderie au sable pour produire des pièces similaires. De plus, les pièces d'acier ont d'excellentes propriétés. Le procédé industriel est restreint à l'URSS. La figure 20 montre un moule et une pièce coulée à l'aide d'un petit appareil expérimental de l'Université de la Colombie-Britannique, où la recherche canadienne dans le domaine a été concentrée. On voit à la fig. 21 un exemple d'une grosse pièce coulée sous laitier électroconducteur en URSS.

Au LRMP, nous assemblons présentement de l'équipement pour la coulée sous laitier électroconducteur, de grandes cartouches avec parois d'un à trois pouces, et aussi de pièces à parois épaisses. Ce travail est un contrat du Ministère de la Défense et Alec Mitchell, de l'Université de la Colombie-Britanique, est l'expert-conseil pour ce projet.

TRAITEMENT DU MÉTAL LIQUIDE

Dans cette section nous examinons deux nouvelles techniques pour traiter le métal liquide dans le système de coulée.

La fonte ductile "Inmold"

La fonte grise est convertie à la fonte ductile par l'addition de magnésium au métal liquide. Normalement, le métal est versé d'un four dans

une poche dans laquelle on a ajouté du ferrosilicium qui contient de 5 à 10% de magnésium (fig. 22). Le magnésium bout, produisant de la lumière éblouissante, de la fumée, et des l'éclaboussures de métal (fig. 23). De 60 à 70% du magnésium est perdu sous forme de vapeur qui s'échappe dans l'atmosphère et flambe.

Le procédé Inmold est montré à la fig. 24. Du ferrosilicium granulaire qui contient 5% de magnésium est placé dans une "chambre de réaction", sous le canal de coulée, de façon a réagir avec le métal qui coule dessus. Avec ce système, on n'a ni lumière, ni fumée, ni flamme (fig. 25). L'amélioration des conditions de travail est un facteur important favorisant l'adoption du système Inmold. La figure 26 montre des bielles et des vilebrequins coulés en fonte ductile Inmold. La technique est fortement favorisée pour les applications où on a besoin de nombreuses pièces coulées identiques, comme les pièces destinées à l'industrie automobile. Vous avez, dans cette région, un excellent exemple du procédé Inmold, à la Fonderie Canobec, à Baie D'Urfé, où les pièces coulées en fonte ductile Inmold sont faites par moulage à haute vitesse automatisé, en sable vert, avec coulée automatique.

Au LRMP nous avons fait des expériences sur la dissolution du ferrosilicium au magnésium pendant le coulage Inmold, utilisant les rayons X pour observer les chambres de réaction. Nous avons préparé un court film dans lequel sont montrées les réactions pour différentes conceptions des chambres de réaction et canaux de coulée. En fig. 27 on voit un exemple de ces observations. On note la vapeur qui s'échappe de la chambre de réaction.

Filtres pour systèmes de coulée

En dépit de la préparation soignée des poches, et de la coulée bien faite, on trouve de temps en temps du laitier, de la crasse, ou du sable dans les pièces coulées. On a donc cherché longtemps un filtre pouvant attrapper de tels matériaux. Pour l'aluminium, des filtres de "mousse céramique" ont été introduits récemment. Pour préparer ce matériel, on infiltre une boue réfractaire dans un type de styrofoam, et après le durcissement, on dissout le styrofoam. Il reste un matériel céramique cellulaire, ouvert à 90% (fig. 28). A la fig. 29 on voit des filtres fabriqués en mousse céramique. Installés dans le canal de coulée, ils se sont montrés très efficaces pour enlever les inclusions d'oxide causont des défauts dans les pièces coulées d'aluminium (fig. 30). Des pièces coulées où des filtres de mousse céramique ont été

utilisés sont montrées en fig. 31. Ces filtres coûtent environ un dollar, alors on ne les utilise que pour des pièces coulées de haute qualité.

Les mousses céramiques courantes ne peuvent pas supporter les températures de la fonte liquide. Ainsi, on cherche maintenant des filtres qu'on peut utiliser pour les alliages ferreux. Au LRMP nous faisons l'essai de filtres fabriqués de petites boules de magnésia ou de bauxite. A la fig. 32 on voit une pièce coulée en double, faite en fonte ductile Inmold. Les pièces de la fig. 32 furent coulées à partir d'une seule descente, avec un filtre d'un côté et sans filtre de l'autre. La surface de la pièce filtrée est bien meilleure.

MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES

Quant au revêtement des fours et des poches, on a tendance à remplacer l'argile par des matériaux réfractaires à haute-alumine, qui sont plus durs, et qui ont des températures de fusion plus élevées. Une autre tendance générale est le remplacement de l'amiante, qui occasionne des problèmes de santé, par un nouveau groupe de produits basé sur des matériaux fabriqués en fibres céramiques artificielles. Des exemples sont montrés à la fig. 33. Ces produits peuvent supporter des températures jusqu'à 2300 F (1620 C). Ils sont légers, et ils donnent un isolement thermique excellent.

Enlever un revêtement de poche usagé et le remplacer est une tâche désagréable, et qui prend du temps (fig. 34). Ainsi, des moyens de faciliter cette opération sont bienvenus. Dans un développement de la compagnie Foseco, le matériel réfractaire habituel est remplacé par des plaques faites de nouveaux matériaux céramiques fibreux, qui sont placées autour de la surface intérieure de la poche (fig. 35). Après quelques coulées, les plaques sont simplement enlevées, des nouvelles installées, et la poche est immédiatement prête à recevoir le métal liquide. Ces revêtements démontrent d'excellentes qualités d'isolement thermique, et une capacité thermique très basse. Ainsi, le préchauffage avant de remplir la poche peut être éliminé.

ALLIAGES DE FONDERIE

J'ai choisi de parler de deux développements récents.

Les alliages zinc-aluminium

L'organization internationale plomb-zinc a développé une nouvelle série d'alliages à base de zinc, qui contient 8%, 11%, ou 26% d'aluminium. Elles se fondent et se coulent comme le zinc, mais elles ont des propriétés mécaniques comparables à celles de la fonte, et leur résistance à la corrosion est similaire à celle de l'aluminium (tableau 2). Elles peuvent être coulées facilement en moules métalliques ou en moules de sable. La figure 36 montre des pièces coulées typiques. La combinaison rare d'excellente coulabilité, de bonne ténacité, et de bonne résistance à la corrosion, fournit une alternative attrayante aux alliages conventionnels dans plusieurs applications.

La fonte graphite compacté

La fonte grise a une ténacité moyenne, une faible ductilité, et une coulabilité excellente. La fonte ductile, au contraire, a une force et une ductilité très supérieures à celles de la fonte grise, mais est moins fluide, a plus de problèmes de crasse, et est plus susceptible aux retraits de solidification. Récemment, un nouveau type de fonte a été introduit, qui tente d'avoir une combinaison de la bonne coulabilité de la fonte grise, et de la force et ductilité de la fonte ductile. Elle est nommée la fonte à graphite compacté, d'après la forme du graphite dans la microstructure, qui est intermédiaire entre les flocons de la fonte grise et les sphéroides de la fonte ductile (fig. 37). Le graphite compacté peut être stabilisé par de faibles concentrations de titane. Comme on voit au tableau 3, les propriétées mécaniques de la fonte à graphite compacté sont inférieures à celles de la fonte ductile, mais très supérieures à celles de la fonte grise.

La fonte à graphite compacté a des applications prometteuses dans la fabrication des lingotières. On a trouvé que le cycle de vie d'une lingotière de ce type est bien plus long que celui d'une lingotière de fonte grise traditionelle à grands flocons de graphite. Il y a aussi des applications pour les pièces d'automobiles telles que les tuyaux d'échappement. A la fig. 38 on voit des volants de gros moteurs Diesel, où la fonte à graphite compacté est maintenant specifiée.

L'EMPLOI D'UN ORDINATEUR

L'emploi d'un ordinateur pour le contrôle de la qualité, l'estimation, et la comptabilité, augmente continuellement. Il est particulièrement

utile dans une fonderie qui fait des pièces coulées diverses où, en réponse à une demande d'information sur une commande spécifique, on peut évaluer immédiatement la situation courante et la date prévue de fin de production. Un système d'ordinateur peut aussi calculer rapidement l'effet sur la production régulière quand une commande urgente est introduite dans l'horaire. Ce genre d'application pour ordinateur est commun avec d'autres industries. Nous allons nous concentrer maintenant sur deux applications qui sont uniques aux fonderies.

Conception de masselottes et de systèmes d'alimentation

La conception de masselottes et de systèmes d'alimentation pour une pièce est une mélange de science, d'économie, d'expérience, et de sens commun. Il est facile de programmer la science et les influence économiques, et à un certain degré l'expérience peut être incorporée dans la mémoire d'un ordinateur. Un ordinateur avec sens commun, cependant, est extrèmement rare. Par exemple, un ordinateur peut produire un schéma de masselottage efficace et économique, mais il est possible que les scies dans la fonderie soient incapables de couper les masselottes avec une telle configuration. La décision ultime va probablement être prise par un ingénieur de fonderie expérimenté.

Il existe quelques programmes d'ordinateur pour dessiner les masselottes. La plupart sont écrits pour les petits ordinateurs tels que les produits de Radio Shack ou d'Apple. Certains d'entre eux sont conçus pour emploi dans une fonderie particulière, et d'autres sont disponibles sous licence des créateurs de programme. De tels programmes peuvent réduire en grande partie le temps de travail et les erreurs associées avec les calculs manuels. Au LRMP nous avons l'intention d'essayer certains programmes disponibles, pour évaluer leur utilité. Nous espérons alors aider les fonderies canadiennes dans leur choix si elles veulent acquérir un tel système.

Calcul des profils de solidification

Le calcul des masselottes donne la grosseur, la forme, et la position des masselottes pour l'alimentation efficace d'une pièce coulée. Il comporte le calcul des durées relatives de solidification des masselottes, du col des masselottes, et de la pièce elle-même. Le calcul des profils de solidification est bien plus compliqué, et de plus gros ordinateurs sont nécessaires. Le but est de déterminer la position de l'interface solide-liquide dans la pièce coulée pendant sa soldification. Avec de tels informations, on peut

déterminer les positions où se trouveront probablement les défauts de retrait. Par exemple, la fig. 39 montre le résultat d'une analyse par ordinateur de la solidification dans une pièce coulée d'acier en forme de baril. Les régions dans l'épaulement supérieure où on prévoit des défauts de retrait sont évidentes.

Ce type de modelage coûte cher et prend beaucoup de temps. Il s'appliquera probablement seulement aux grandes pièces, où le coût des pièces coulées d'essai seraient prohibitif. Quand on coule une pièce de 50 tonnes, on veut la conserver.

Une enquête à grande échelle sur l'analyse par ordinateur de la solidification des pièces coulées a été mise en marche aux Etats-Unis, appuyée par leur "National Science Foundation". Le travail est divisé entre les Université de Georgia et de Michigan. Leur but est de développer un système universel dans lequel une fonderie pourra insérer le dessin d'une pièce coulée quelconque, et calculer ainsi son mode de solidification.

LES ROBCTS

Il existe deux moyens de réduire les problèmes de la chaleur, de la poussière, de la vibration, etc, dans une fonderie. L'un est d'éliminer la cause du trouble, ou d'enlever mécaniquement le matériel désagréable, et l'autre est de remplacer les hommes par les machines qui ne sont pas affectées par de telles conditions. Un problème existe avec cette dernière solution. La même chaleur, poussière, fumée, et vibration qui déplaisent aux employés donnent aussi un environnement très hostile au fonctionnement des robots, qui sont, malgré tout, des machines mécaniquement raffinées, électroniquement contrôlées, et un peu délicates. Les robots préfèrent aussi les conditions propres, hors-de-vibration, et fraîches, une des raisons pourquoi ils ont été introduits graduellement dans la fonderie.

La section la plus prometteuse d'une fonderie pour l'usage de robots est l'ébarbage, par exemple l'enlèvement de masselottes ou de plaque d'écoulement. Les robots sont très habiles à des tâche telles que meulage, débourrage, ou coupage au chalumeau, où ils suivent une séquence de mouvements préprogrammés avec une précision inlassable. A la fig. 40 on voit une machine à meulage prototype pour les grosses pièces coulées. La fig. 41 montre une unité fabriquée par la compagnie suédoise ASEA, pendant la programmation, et pendant l'enlèvement automatique des attaques et de la barbe.

Les simples robots qui portent des objets de point en point sont utilisés fréquemment dans le moulage sous pression, soit pour enlever la pièce coulée du moule, soit pour vaporiser les lubrifiants, soit pour placer les noyaux. Les robots sont souvent utilisés aussi dans la coulée à cire perdue; dans un cas ils ont été programmés pour enlever les patrons de cire d'un transporteur, pour les tremper plusieurs fois dans les boues réfractaires, et pour les retourner au transporteur (fig. 42).

L'utilisation de robots dans la fonderie est au stage préliminaire. La plupart des opérations de moulage et de coulée, ainsi bien que presque toutes des opérations de raccord, vont probablement être faites par les robots dans un proche avenir.

SOMMAIRE

Je veux noter que j'ai parlé seulement des développements qui peuvent exercer des effets significatifs sur les fonderies, aujourd'hui ou dans le futur. J'ai omis certains sujets séduisants tels que la solidification directionelle des ailettes de turbines à gaz, la solidification des matériaux composites, ou la coulée des demi-solides, parce que, bien qu'ils soient importants au point de vue technologique, il est improbable que ces procédés aient de grandes influences sur la plupart des fonderies.

Finalement, je veux exprimer ma confiance que l'adoption de nouvelles techniques permettra aux fonderies de demeurer compétitives avec les autres méthodes de manufacture, et en même temps fera de la fonderie de l'avenir un meilleur endroit de travail.

Tableau 1. Besoins d'énergie dans une fonderie de fonte typique.

Opération	Distribution d'énergie, %
Fusion	61
Moulage et noyautage	13
Chauffage du bâtiment	13
Contrôle de la pollution	6
Coulée, ébarbage, nettoyage	6
Autre	1

Tableau 2. Tableau de comparaison des propriétés

Composition	Alliages de fonderie de zinc			Matériaux compétitifs		
	Tg-8	Tg-12 (ASTM B-669)	Tg-27	Fonte (classe 30)	Aluminium (AA356T6)	Bronze (SAE-660)
Aluminum (pds %)	8,0-8,8	10,5-11,5	25-28			
Cuivre	0,8-1,3	0,5-1,0	2,0-2,5	par spéc.	par spéc.	par spéc.
Magnésium	0,015-0,030	0,015-0.030	0,01-0,02			
Fer	<0,10	<0,075	<0,10			
Plomb	<0,004	<0,004	<0,004			
Cadmium	<0,003	<0,003	<0,003			
Etain	<0,002	<0,002	<0,002			
Zinc	Bilan	Bilan	Bilan			
Propriétés physiques						
Densité (lb/po^3) à 70°F	0,227	0,218	0,181	0,26	0,097	0,322
Densité spécifique	6,30	6,03	5,00	7,22	2,68	8,83
Température de recuit (°F)	Aucune req.	Aucune req.	Aucune req.	Comme req.	Comme req.	Comme req.
Echelle de fusion (°F)	707-759	710-810	708-903	2100-2200	1250-1500	1570-1790
Echelle de température de coulée (°F)	800-900	850-975	950-1075	2200-2600	1250-1450	1750-1800
Chaleur spécifique (BTU/lb/°F) à 75-198°F	0,104	0,107	0,125	0,13	0,23	0,09
Rétrécissement de solidification (%)	1,0	1,2	1,3	1%	-	-
Coefficient d'expansion (upo/po/°F) à 68-212°F	12,9	15,5	14,4	5,8	11,9	10,0
Conductivité thermique (BTU.pi/pi^2.h.°F à 75°F	66,3	67,1	72,5	72,5	26,6	34,0
Conductivité électrique (% IACS) à 68°F	27,7	28,3	29,7	-	39	12,0
Résistivité électrique (uΩpo) à 68°F	6,20	6,10	5,80	31,5	44,2	-
Marge de rétrécissement du modèle (po/pb)	1/8	5/32	5/32	1/8	5/32	7/32

Table 2 - cont'd

Propriétés mécaniques								
Méthode de coulée	En coquille	En sable	En coquille	En sable		En sable	En sable	En sable
				Brut de coulée	Trait. ther.			
Résistance à la traction (KPSI)	32-37	40-45	45-50	58-64	45-47	30-34	33	30-38
Tension de fluage (KPSI) 0,2% offset	29-31	30-31	31-32	53-54	37	24	24	17-21
Elongation (% dans 2")	1-2	1-3	1-3	3-6	8-11	0,6	3,5	12-20
Dureté (GHN), 500, 10, 30 sec	85-90	105-125	105-125	110-120	90-100	179-228	70	55-65
Résistance au cisaillement (KPSI)	35	36-38	36-38	41-43	32-33	40	26	-
Résilience (pi lbs, 1/4 x 1/4, barre sans encoche	-	12	12	11	19	NR	-	6
Résistance à la fatigue (KPSI), cycles 5×10^8, essai de traction-poussée	-	8	8	15	-	-	-	-
Limites d'endurance (KPSI), cycles 5×10^7, essai de fatigue par tension rotative	7.5	15	15	25	15	-	8.5	-
Résistance au fluage (KPSI) contrainte pour produire 1% de tension 100 000 h	7[a]	3[a]	3[a]	~10	~13	3.0	7.5	-
Vitesse de fluage (%/1000 h) à une contrainte de 20 KPSI à 68°F	~0.2	4.95	4.95	0.1	0.07	0.00	-	-

Table 3. Les propriétés de la fonte à graphite vermiculaire comparées à gris

Type de fonte (gris ou ductile)	Equiv. approx. de carbone %	Propriétés mécaniques				Elong %	Conductivité thermique Btu-pi/h-pi^2-F (W/m-K)			
		Rés. à la traction		Tens. de fluage[a]			Sections légères-moyennes		Sections lourdes	
		1000 lb/po^2	(MPa)	1000 lb/po^2	(MPa)					
Fonte grise[aa]										
Classe 25	4.4	25	(172)	15	(103)	<1	30.2	(52.3)	29.0-32.7	(50.2-56.6)
Classe 30	4.2	30	(207)	20	(138)	<1	-	-	-	-
Classe 45	3.6	45	(310)	25	(172)	<1	27.3	(47.3)	-	-
Fonte à graphite vermiculaire	4.2	48-57	(331-393)	33-41	(228-283)	3-5	28.5	(49.3)	25.4-29.0	(44.0-50.2)
Fonte ductile	4.2	60-70	(414-483)	38-47	(262-324)	7-12	19.4	(33.6)	21.8	(37.7)

[a] A 1,1% offset

[aa] ASTM A48-74

Fig. 1. Tasse, soucoupe, et cuiller, coulée en une seule pièce.

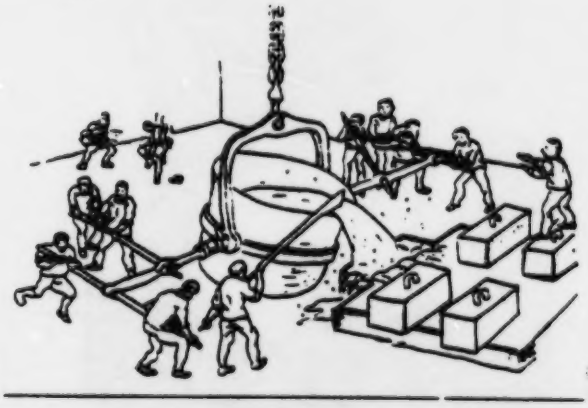


Fig. 2. Illustration du 19ième siècle, montrant l'opération de coulée.

Fig. 3. Traitement thermique dans la fonderie au LRMP.

Fig. 4. Coulage d'acier d'un four dans la fonderie au LRMP.

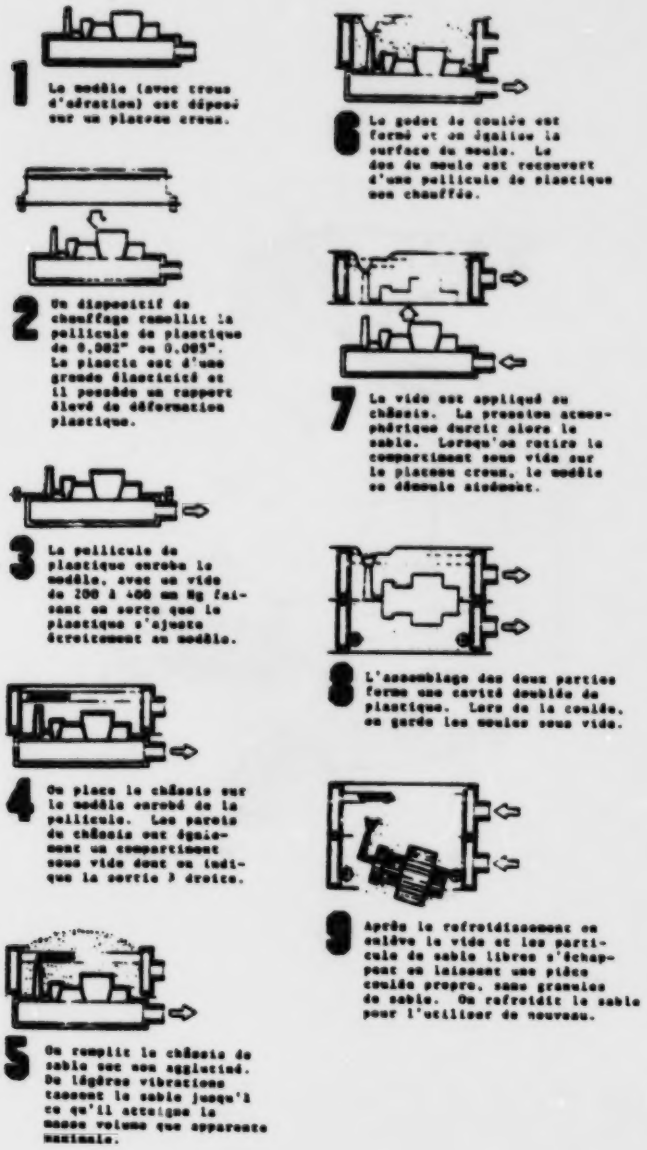


Fig. 5. Séquence du procédé en V.

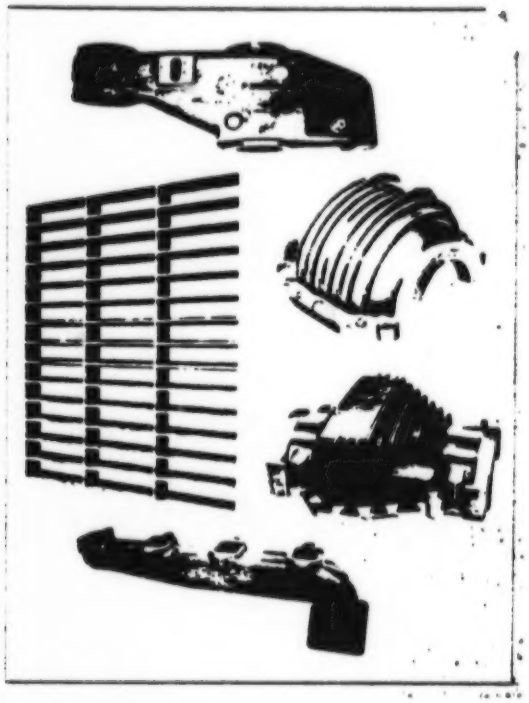
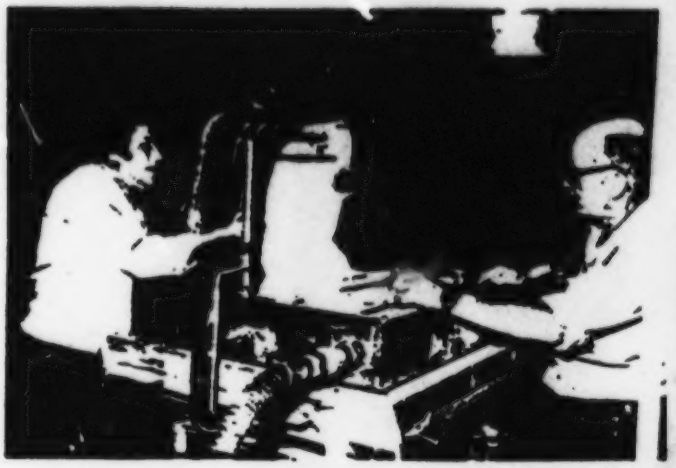
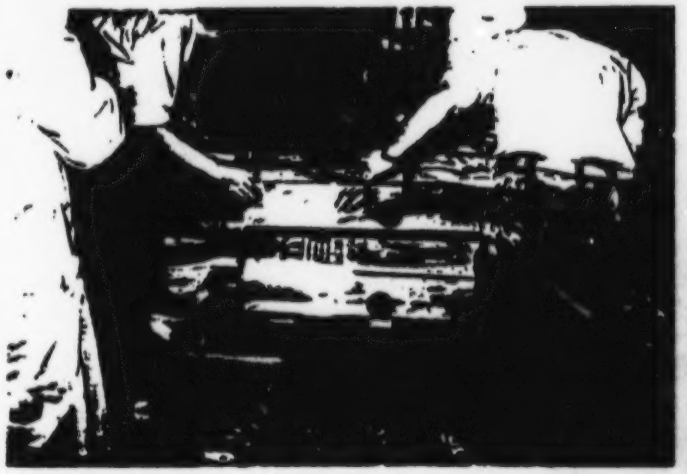


Fig. 6. Pièces coulées typiques du procédé de moulage sous vide.

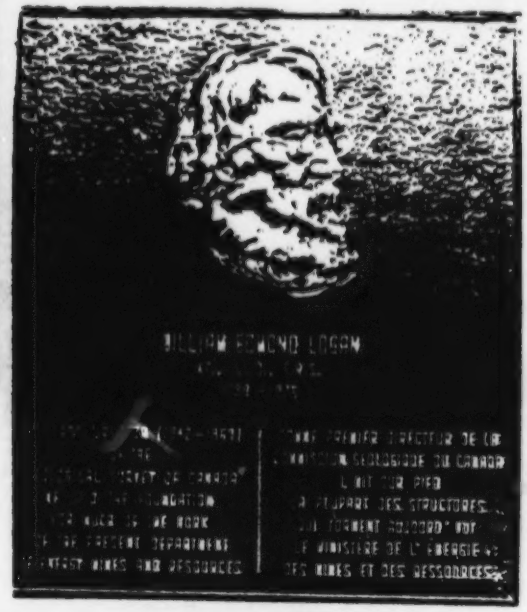


(a) préparation du moule

(c) coulage du moule



(b) fermeture du moule



(d) plaque finie.

Fig. 7. Production d'une plaque de bronze au LRMP.

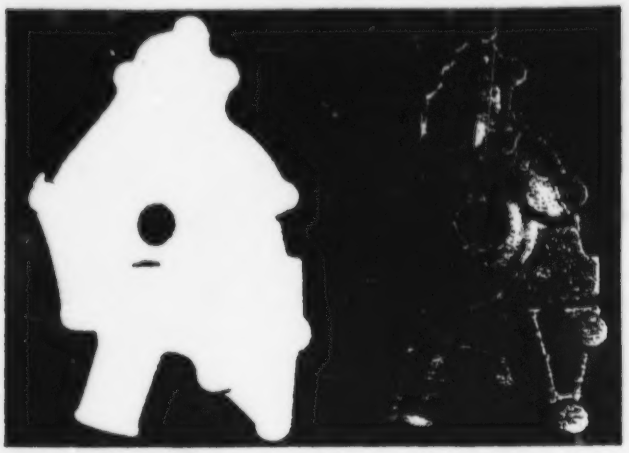


Fig. 8. Patron de styrofoam et pièce de fonte ductile coulée par le procédé de styrofoam évaporateur.

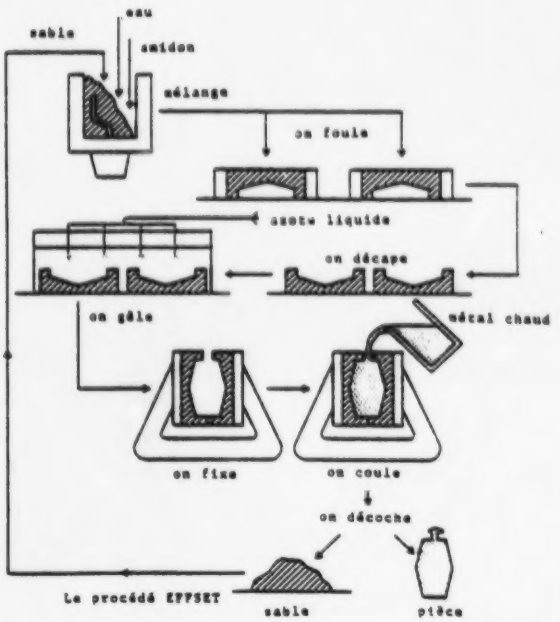
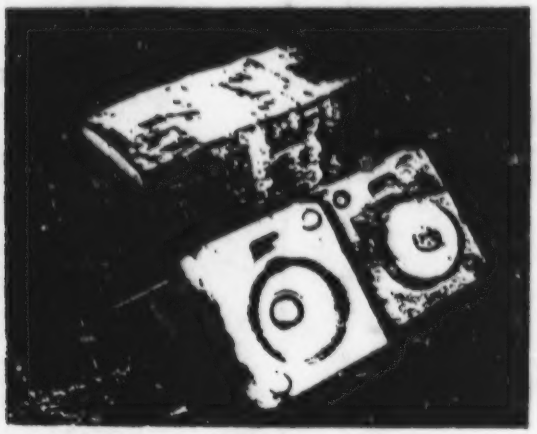
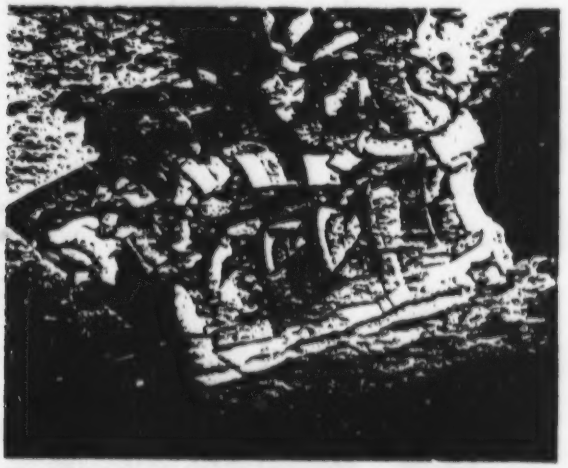


Fig. 9. Esquisse du procédé "Effset" (moule gelé).



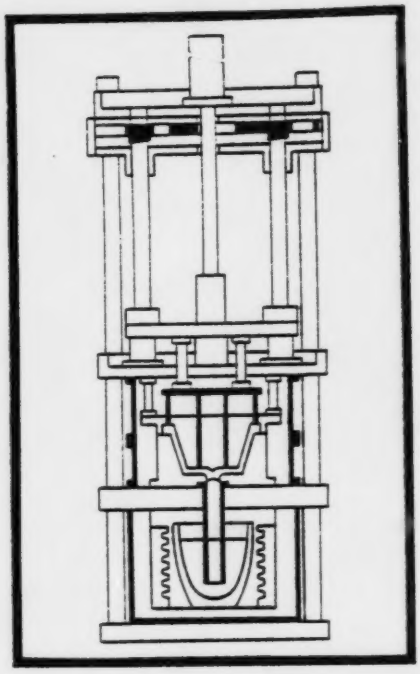
(a) moule gelé prêt à être coulé



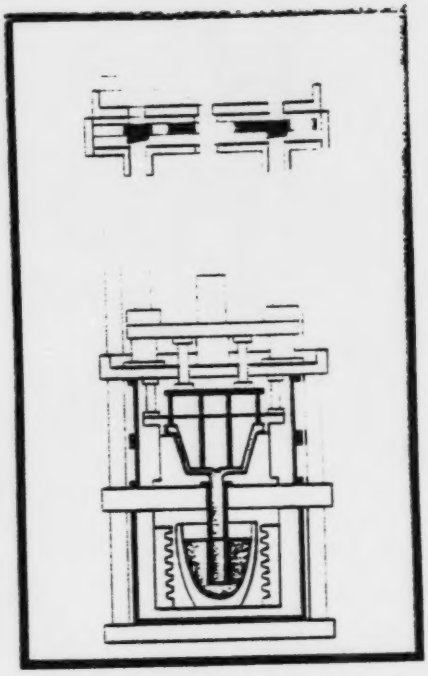
(b) 5 minutes après le coulage en fonte

(c) la pièce coulée.

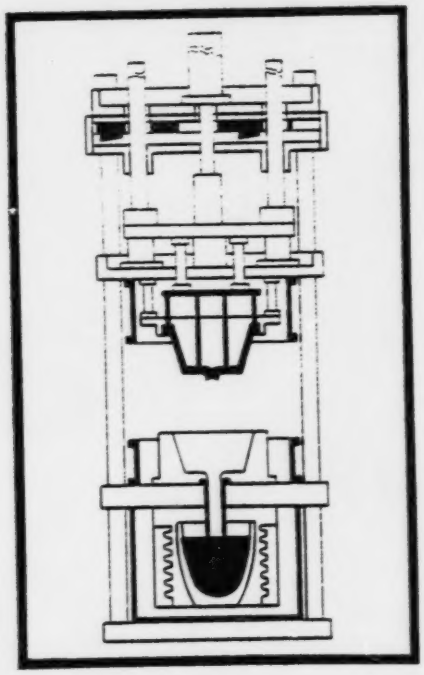
Fig. 10. Coulage "Effset".



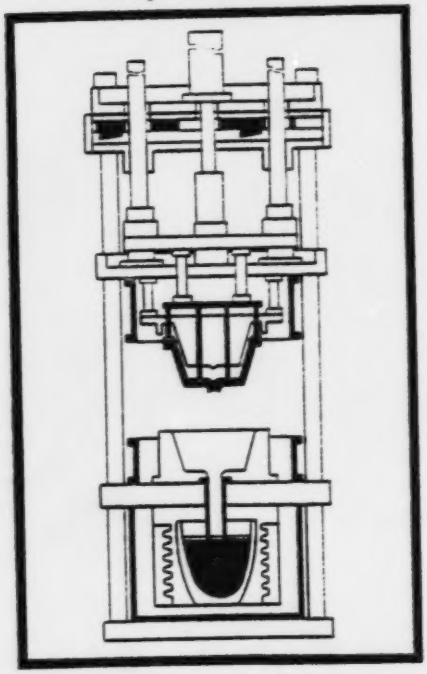
(a) moules en position fermées



(b) chambre pressurisée pour remplissage du moule



(c) moules ouverts



(d) pièce coulées ejectée du moule

Fig. 11. Fonctionnement d'une machine de coulée à basse pression.

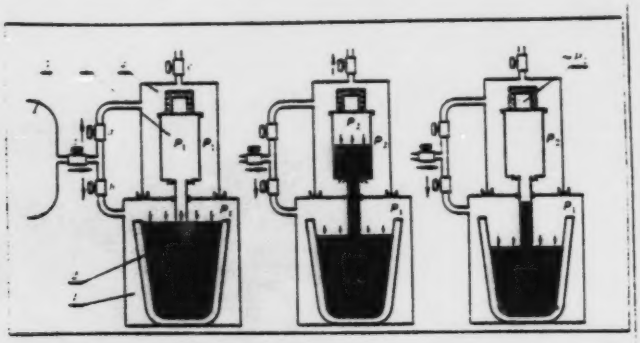


Fig. 12. Esquisse de coulée du système contre-pression.

Fig. 13. Pièces coulées typiques du système contre-pression.

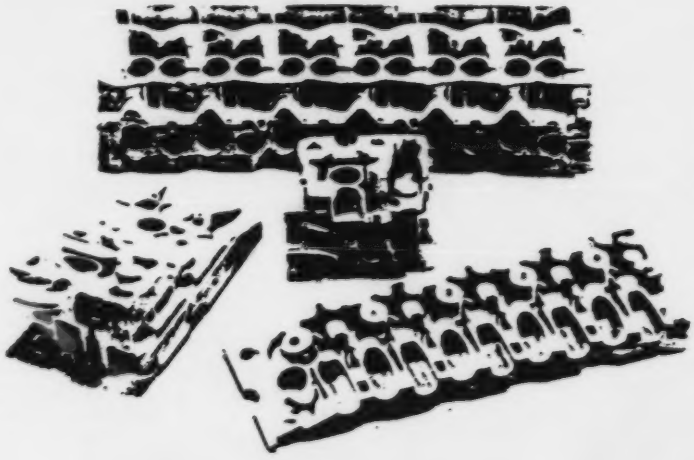
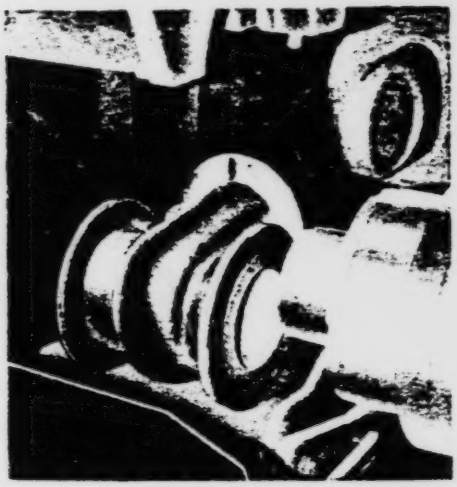


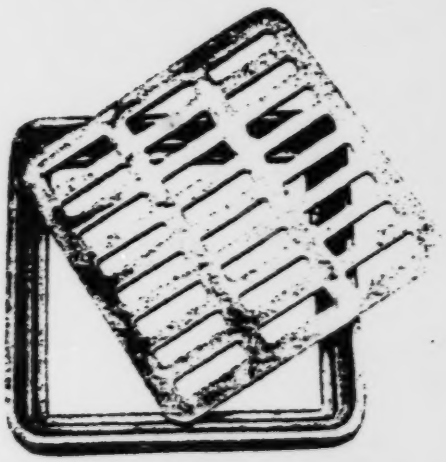
Fig. 14.

Pièces coulées d'automobile, en aluminium, produites en moules permanents.

(a) pièce cylindrique avec noyaux en sable

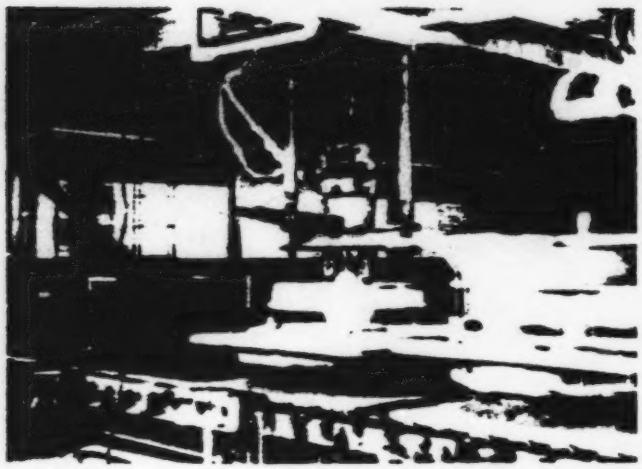


(b) pièce produite avec noyaux métalliques

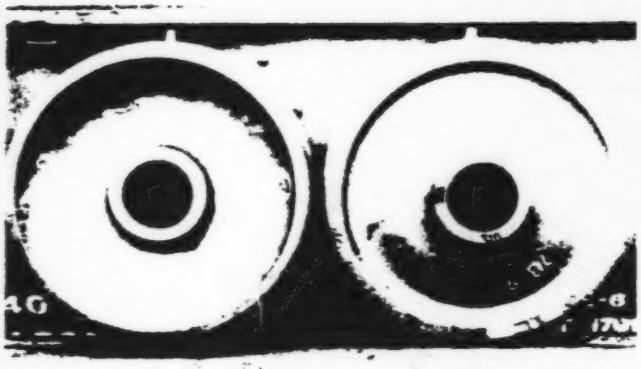


(c) couvercle et grille pesant plus de 100 livres.

Fig. 15. Pièces coulées en fonte grise, produites en moules permanents en Tchecoslovaquie.

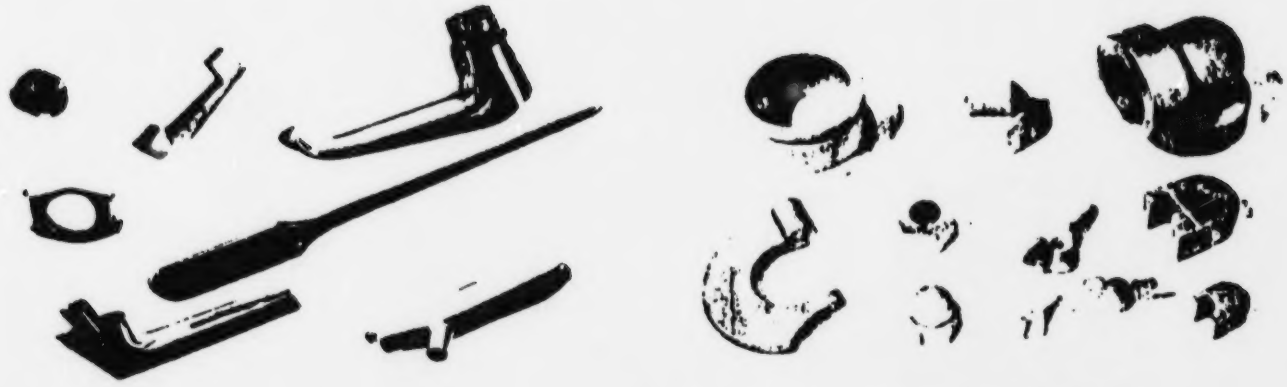


(a) roue enlevée du moule



(b) roues typiques

Fig. 16. Procédé 'Griffin' employant des moules en graphite pour la production de roues en acier pour chemin de fer.



(a) acier inoxydable (b) acier au carbone

Fig. 17. Methode Ferro-Di pour le coulage d'alliages ferreux.

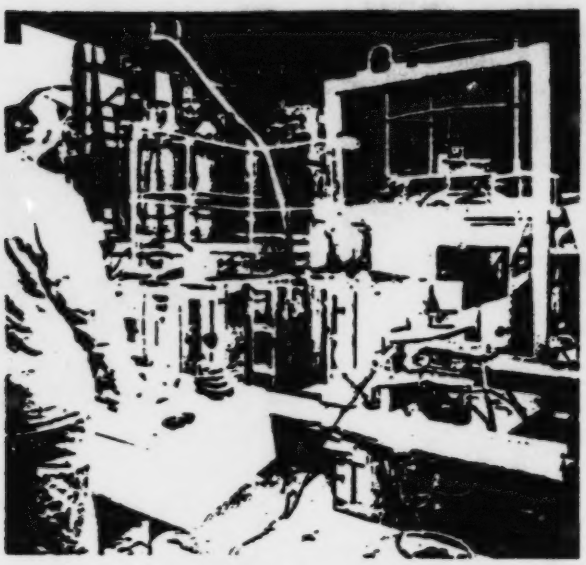


Fig. 18. Procédé de George Fischer pour le coulage d'alliages ferreux dans des moules en cuivre refroidis à l'eau.

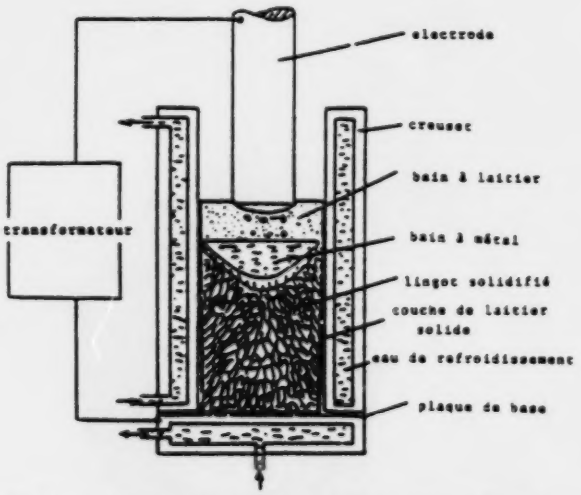


Schéma du procédé de refusion sous laitier électro-conducteur.

Fig. 19. Schéma du procédé de refusion sous laitier électro-conducteur.

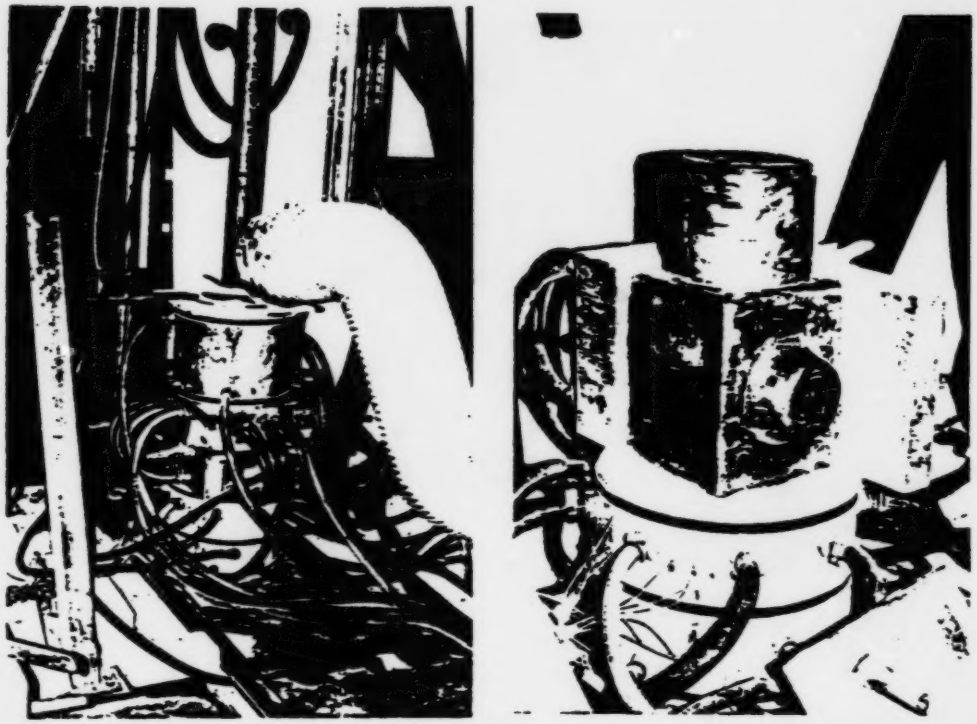


Fig. 20 (a). Petit appareil experimental de coulée sous laitier électroconducteur. (neg 5880)
(b) Retrait d'une pièce coulée en acier. (neg 5881)

Fig. 21. Large pièce coulée en Russie sous laitier électroconducteur.

Fig. 22. Poche pour la méthode simple.

Fig. 23. Fumée et lumière éblouissante produites par la méthode simple de traitement dans la poche pour la production de la fonte ductile.

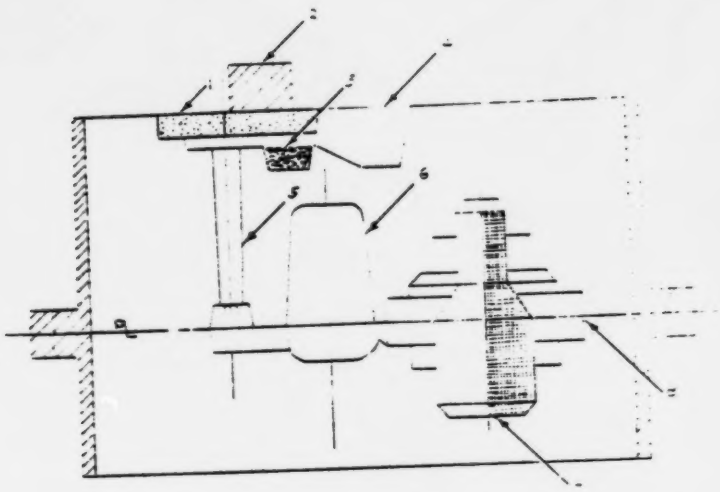
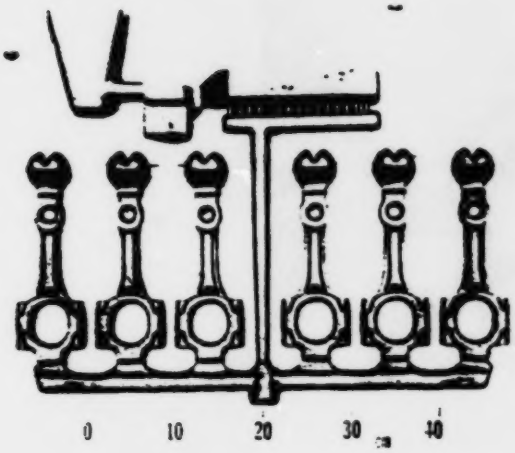
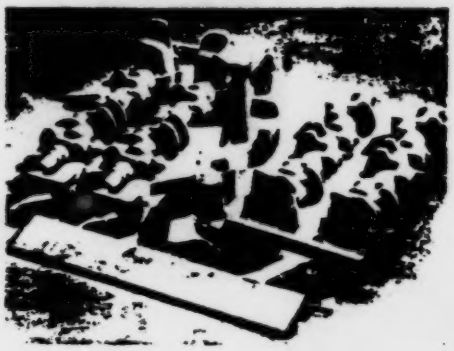


Fig. 24. Esquisse du procédé Inmold pour la production de la fonte ductile.

Fig. 25. Coulage de fonte ductile par la méthode Inmold.





(a) bielles (b) vilebrequins.

Fig. 26. Pièces d'automobile en fonte ductile coulée par la méthode Inmold.

Fig. 27. Image fluorescente, produit à l'aide de rayons-X, d'une chambre de réaction Inmold, montrant la génération de la vapeur de magnésium provenant du magnésium ferrosilicium. (neg 2985)

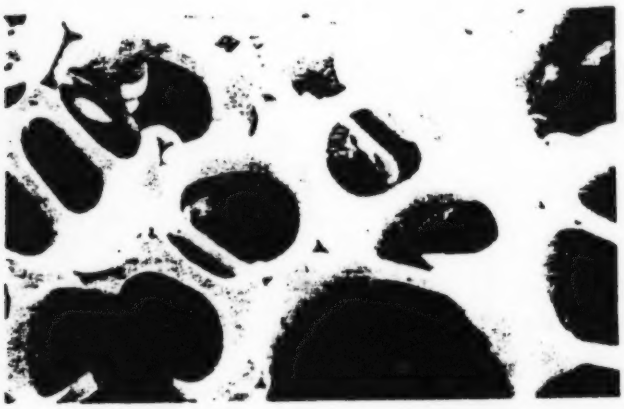


Fig. 28. Image d'un microscope électronique à balayage, montrant la structure de la mousse céramique.

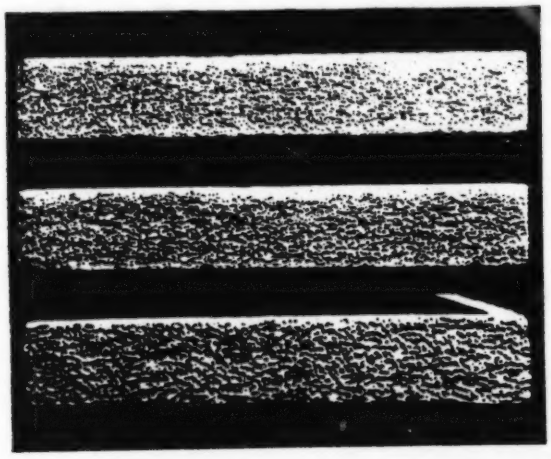


Fig. 29. Filtres en mousse céramique.

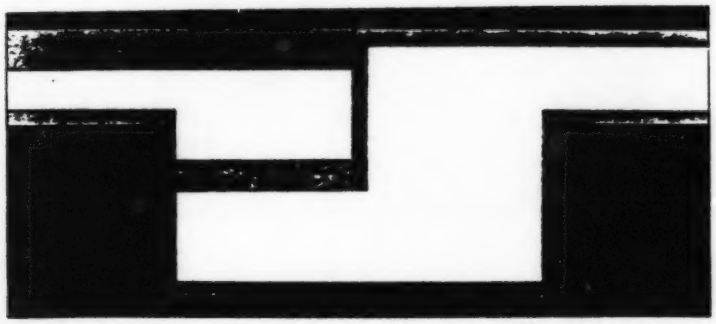


Fig. 30. Esquisse d'un filtre dans le canal de coulée.

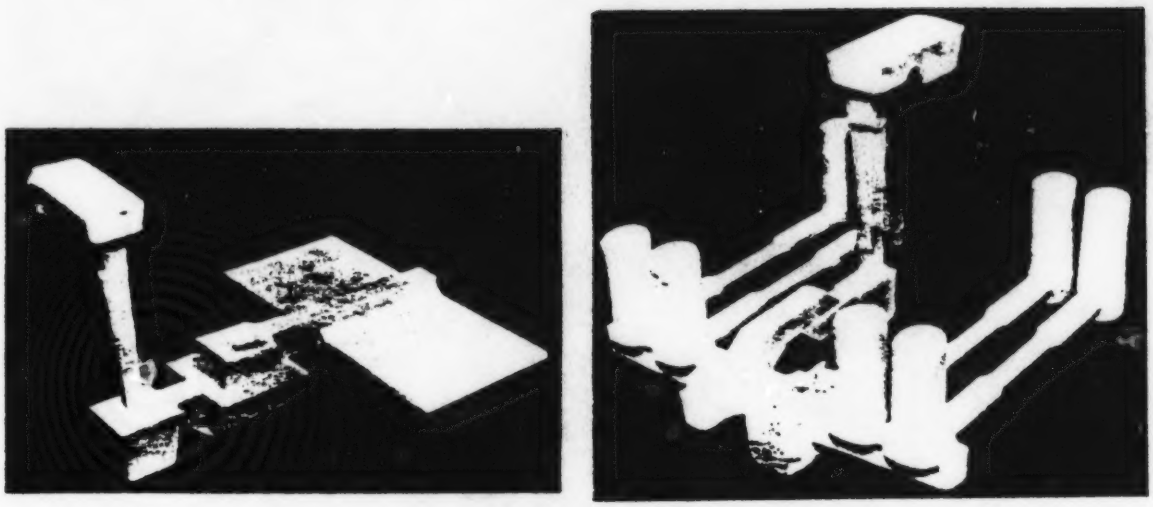


Fig. 31. Pièces d'aluminium coulées avec filtres de mousse céramique.

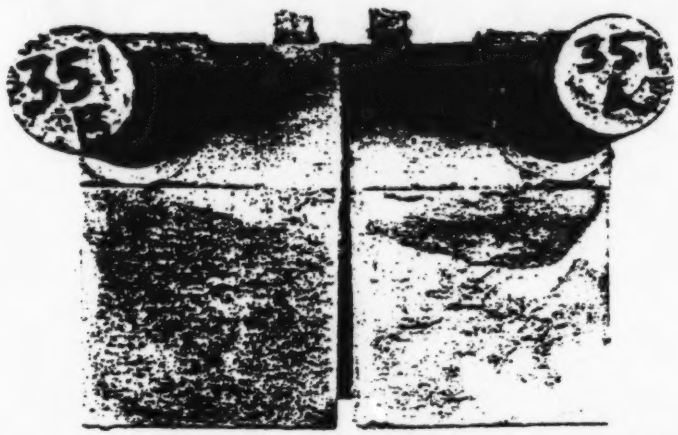


Fig. 32. Surfaces supérieures de pièces coulées en fonte ductile Inmold, provenant d'une même descente de coulée. La pièce à droite avait un filtre. (neg 4464)

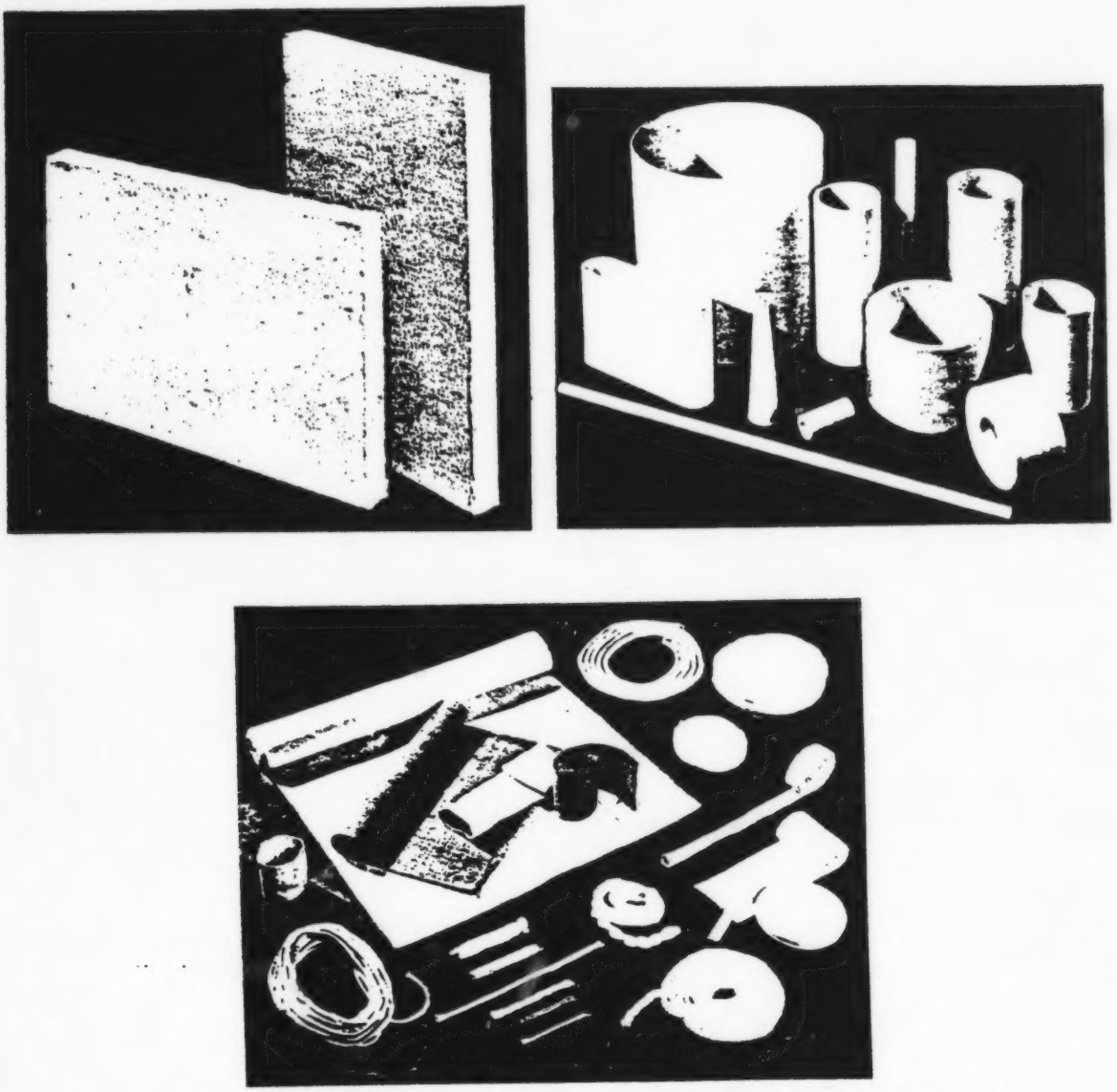


Fig. 33. Matériel de fibre céramique employé pour remplacer l'amiante.

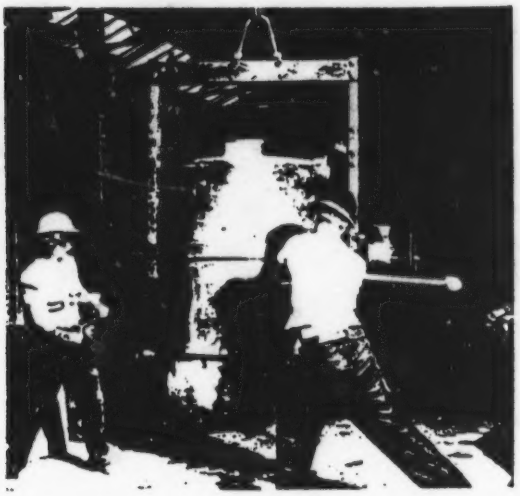


Fig. 34. Méthode traditionelle de remplacement de réfractaire usé dans les poches de coulée.

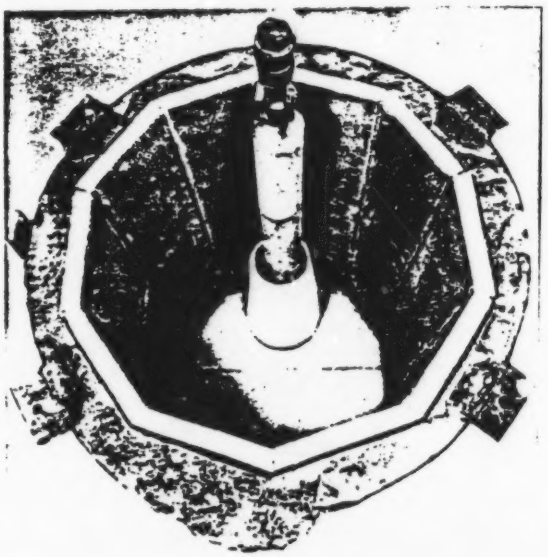


Fig. 35. Planches de fibre céramique utilisées pour le revêtement d'une poche de coulée.

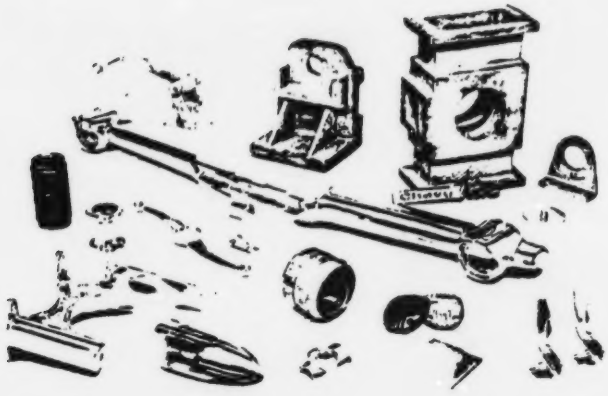


Fig. 36. Pièces coulées avec nouveaux alliages de fonderie de zinc-aluminium.

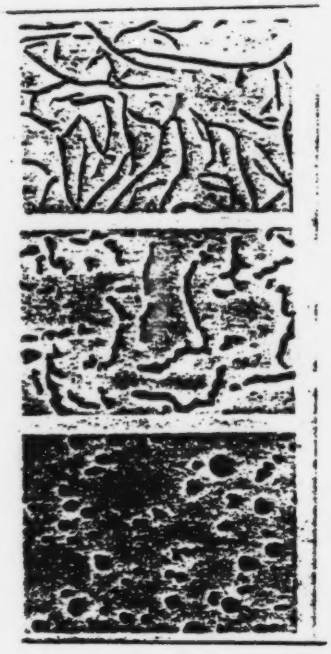


Fig. 37. Formes de graphite dans la fonte grise, compactée, et ductile.

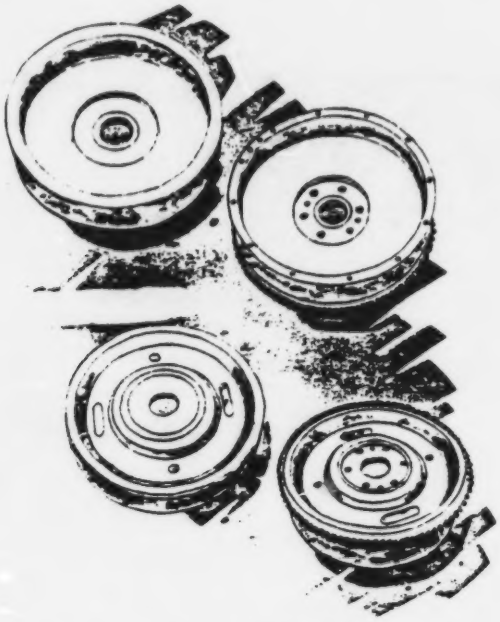


Fig. 38. Pièces coulées pour moteurs diesel.

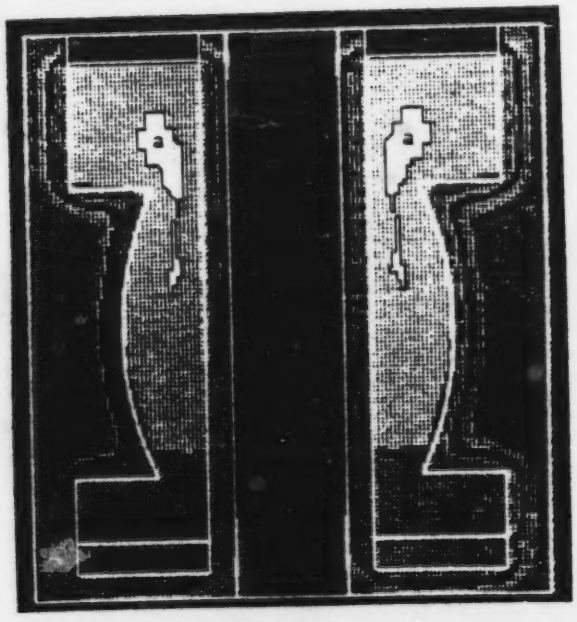


Fig. 39. Profils de solidification calculés sur une pièce coulée avec épaulement (la région 'a' est la dernière à se solidifier).

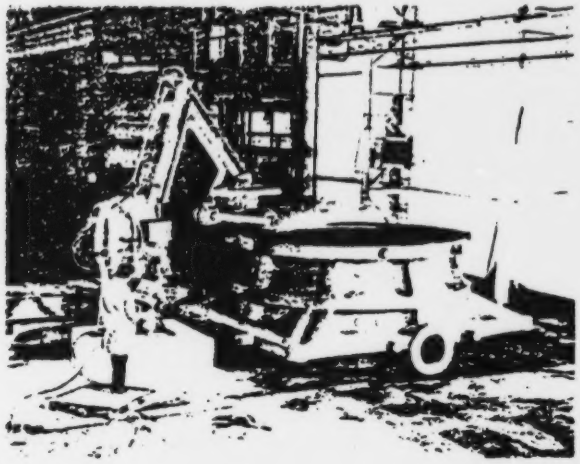
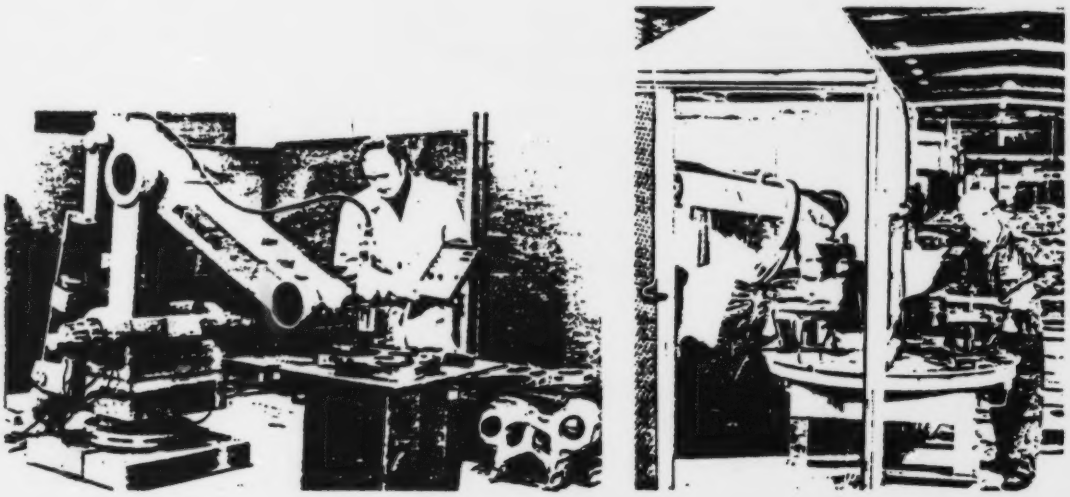


Fig. 40. Meule automatisée pour la finition de grosse pièces coulées en acier.



(a) (b)

Fig. 41. (a). Machine automatisé ASEA étant programmé pour le débourrage.
(b). Machine semblable finissant une pièce coulée.

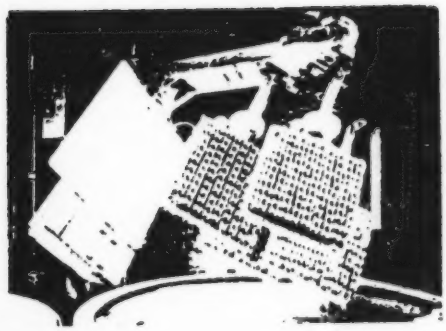


Fig. 42. Robot manipulant des patrons en cire.